

УДК 621.923:[621.922]

Ю.Д. ФИЛАТОВ, д-р техн. наук,
В.И. СИДОРКО, д-р техн. наук,
С.В. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук,
В.А. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук,
О.Я. ЮРЧИШИН, канд. техн. наук, Киев, Украина

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА ПОЛИРОВАЛЬНОГО ПОРОШКА В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

В результаті дослідження закономірностей руху частинок шламу та зносу полірувального порошку всередині суспензії розраховано їхні траєкторії руху, які являють собою кільця, розташовані безпосередньо поблизу оброблюваної поверхні в зоні товщина якої 150 нм приблизно дорівнює половині розміру зерна полірувального порошку.

Ключові слова: шлам полірувального порошку

В результате исследования закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри суспензии рассчитаны их траектории движения, которые представляют собой кольца, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности в зоне толщиной 150 нм, приблизительно равной половине размера зерна полировального порошка.

Ключевые слова: шлам полировального порошка

As a result of studying the regularities of the movement of slime particles and the wear of the polishing powder, trajectories of the motion are calculated inside the slurry, which are rings located in close proximity to the surface to be treated in a zone of thickness 150 nm, approximately equal to half the grain size of the polishing powder.

Keywords: slime particles of the polishing powder

Введение

Изучение закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри полировальной суспензии при обработке деталей электронной техники и оптических систем, взаимодействия зерен полировального порошка с поверхностями обрабатываемой детали и притира осуществляется на основе кластерной модели съема материала при полировании [1] и физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [2], а также результатов исследования механизма диспергирования частиц шлама, их распределения по размерам [3, 4], динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне [5]. Вместе с тем, процессы взаимодействия частиц шлама (ЧШ) и частиц износа (ЧИ) полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой поверхности с поверхностью притира внутри полировальной суспензии при полировании элементов электронной техники и оптических систем из

керамических материалов, оптических и полупроводниковых кристаллов изучены недостаточно, а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа зерен полировального порошка на поверхности притира не выяснены.

Целью исследования является изучение закономерностей движения частиц шлама и износа полировального порошка внутри полировальной суспензии при обработке оптоэлектронных элементов из керамики на основе нитрида алюминия.

Методика исследований

Элементы из керамики на основе нитрида алюминия полировали при помощи водной суспензии порошков нитрида бора КМ 0,5/0 на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения пенополиуретанового притира диаметром 100 мм – 90 об/мин, усилие прижима детали диаметром 60 мм к притиру – 50,5 Н, средней температуре в зоне контакта 300 К, времени полирования 30 мин. Нитрид алюминия (AlN, плотность – 3,26 г/см³, энергия связи – 6,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки $a = 0,3112$ нм, $c = 0,4982$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов AlN – 248,6; 611,0; 657,4; 670,8; 890,0 и 912,0 см⁻¹ [6, 7]) обрабатывались суспензией порошков кубического нитрида бора (плотность – 2,18 г/см³, статическая диэлектрическая проницаемость – 2,5, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов в cBN – 1055; 1125 и 1305 см⁻¹ [8]), в результате чего образовывались частицы шлама и износа полировального порошка, которые взаимодействовали между собой, а также с обрабатываемой поверхностью и поверхностью притира.

При полировании нитрида алюминия суспензией порошков КМ 0,5/0 образуются частицы шлама, размеры которых составляют дискретный набор: 1,7; 2,4; 2,9; 3,4 и 3,8 нм, их наиболее вероятный размер – 2,3 нм. Концентрация частиц шлама, которые образуются на площади контакта обрабатываемой поверхности и притира в единицу времени составляет $1,83 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Среднее значение объема частиц шлама – $2,4 \cdot \text{нм}^3$, количество молекулярных фрагментов AlN в частице шлама $\xi_1 = 57$. Среднее значение объема частиц износа полировального порошка – $2,8 \cdot \text{нм}^3$ (средний размер – 1,8 нм), количество молекулярных фрагментов BN в частице износа $\xi_2 = 74$. В процессе полирования в зоне контакта обрабатываемой детали и притира (объемом $1,39 \text{ мм}^3$) внутри полировальной суспензии образуются частицы шлама и износа полировального порошка общим объемом $9 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, то есть объем всех образовавшихся за это время частиц меньше объема контактной зоны в 500 раз. На одну частицу шлама (или частицу износа полировального

порошка) приходится объем 760 нм^3 , а среднее расстояние между ними составляет 9 нм .

Закономерности движения частиц шлама и износа в зоне контакта обрабатываемой поверхности и притира

Рассматривая взаимодействие частиц шлама внутри суспензии на основе закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частиц [9-11] с учетом потенциала межмолекулярного взаимодействия, для двухчастичных столкновений угол θ_{ij} рассеяния можно выразить формулой [9, 10, 12]

$$\theta_{ij} = \pi - 2 \int_{R \min}^{l_0} \frac{b_{ij} dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_{ij}}{x}\right)^2 - \frac{U_{ij}(x)}{E_i}}}, \quad (1)$$

где $b_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ – прицельное расстояние, d_i – размеры i -х частиц шлама, x – расстояние между частицами, $U_{ij}(x)$ – потенциал межмолекулярного взаимодействия, $E_i = \frac{1}{2}\rho_1 v_i u^2$ – кинетическая энергия частицы, v_i – объем i -й частицы, $i = \overline{0, k-1}$ – номер частицы, $k = 5$ – число выборок в пуассоновском распределении частиц шлама по площадям поверхности, $u = 0,24 \text{ м/с}$ – скорость относительного перемещения детали и притира, $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_{j=0})$ – расстояние наибольшего сближения частиц.

С учетом распределения частиц шлама по размерам определен диапазон возможных значений угла рассеяния частиц шлама на частицах шлама: среднее $\bar{\Theta} = 153,8^\circ$, минимальное $\Theta_{\min} = 136,8^\circ$ и максимальное $\Theta_{\max} = 171,0^\circ$ значения. Показано, что более крупные частицы шлама рассеиваются на меньшие углы. С увеличением размера частиц шлама, на которых происходит рассеивание частиц, угол рассеяния также уменьшается. Кроме того, для произвольных размеров частиц шлама, участвующих в процессе рассеяния, частицы после соударений изменяют направление своего движения на угол не менее $3\pi/4$ рад., разлетаясь в противоположные стороны.

Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама $\sigma_{ij} = \pi(d_i + d_j)^2$ для всех рассматриваемых соударений частиц изменяется от $0,4$ до $1,8 \text{ Тб}$ ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Величина эффективного дифференциального сечения рассеяния частиц шлама увеличивается при увеличении размеров частиц, участвующих в рассеянии. Количество частиц шлама, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ за единицу времени, определяемое по

формуле [9, 11] $dn = n_i n_j \sigma_{ij} d\Omega$, позволяет представить зависимость плотности распределение частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega}$ от угла рассеяния, показывающую, что частицы большего размера рассеиваются меньше.

Рассматривая взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка внутри суспензии с учетом их межмолекулярного взаимодействия, среднего размера частиц износа полировального порошка ($d_2 = 1,8$ нм), прицельного расстояния $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ и расстояния наибольшего

сближения частиц шлама с частицами износа $R_{\min} = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_2)$, можно по формуле, аналогичной (1) рассчитать угол $\theta_2(i)$ рассеяния частиц шлама, а также выявить зависимость угла рассеяния частиц шлама на частицах износа полировального порошка от их размеров и определить его минимальное $\Theta_{\min} = 143,8^\circ$ и максимальное $\Theta_{\max} = 171,6^\circ$ значения. При увеличении размера i -х частиц шлама их угол рассеяния на частицах износа уменьшается, то есть более крупные частицы шлама рассеиваются на частицах износа полировального порошка на меньший угол. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама на частицах износа полировального порошка $\sigma_i = \pi(d_i + d_2)^2$ изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,0 Тб и увеличивается при увеличении размеров частиц шлама, участвующих в рассеянии. Плотность распределения частиц шлама имеет максимум $(0,7 \cdot 10^{14})$ при угле рассеяния $164,7^\circ$, который соответствует частицам шлама размером 2,4 нм, рассеиваемым на частицах износа на угол $164 - 165^\circ$. Число частиц шлама, рассеянных на частицах износа полировального порошка в интервале углов $[143,8; 171,6]$, уменьшается при увеличении их размеров.

Рассматривая взаимодействие частиц износа полировального порошка между собой с учетом потенциал их межмолекулярного взаимодействия, прицельного расстояния и расстояния их наибольшего сближения, которые равны их среднему размеру $d_2 = 1,8$ нм, можно рассчитать угол их рассеивания $\theta_{22} = 173,2^\circ$. При этом их эффективное дифференциальное сечение рассеяния достигает значения 0,4 Тб, а плотность распределения

частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega} = 1,3 \cdot 10^{14}$.

В результате анализа закономерностей рассеяния частиц шлама и износа полировального порошка установлено, что при рассеянии всех частиц, которые образуются в процессе полирования внутри суспензии (частиц шлама на частицах шлама, частиц шлама на частицах износа полировального порошка и частиц износа на частицах износа), угол рассеяния лежит в диапазоне $[136,8^\circ - 173,2^\circ]$, эффективное дифференциальное сечение

рассеяния (Тб) – $[0,4 - 1,8]$, а плотность распределения частиц

$$\frac{dn}{d\Omega} = (0,3 - 1,3) \cdot 10^{14}.$$

Траектории движения частиц шлама и износа полировального порошка

Траектории движения частиц рассчитаны в системе координат, связанной с суспензией, заполняющей зону контакта обрабатываемой поверхности и притира, исходя из допущения, что частицы влетают в неподвижную среду, в которой они равномерно распределены, с постоянной скоростью. При помощи метода Монте-Карло рассчитывались углы, на которые отклонялась i -я частица шлама при рассеянии на j -ой частице шлама. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирался номер j_m и соответственно определялся угол рассеяния θ_{ij} . Величина угла, на который отклонилась i -я частица шлама после m столкновений, определялась формулой

$$\Delta_{im} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{j=1}^m (\vartheta_{ij})_m, m \geq 1 \end{cases}, \quad (2)$$

а ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней линией профиля обрабатываемой поверхности):

$$X_{im} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{im}, \quad (3)$$

$$Z_{im} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{im}. \quad (4)$$

При рассеивании частиц износа полировального порошка на i -х частицах шлама угол, на который они отклонились после m столкновений, и их координаты определялись формулами:

$$\Delta_{2m} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{m=1}^m [\vartheta_2(i)]_m, m \geq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

$$X_{2m} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{2m}, \quad (6)$$

$$Z_{2m} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{2m} . \quad (7)$$

При рассеивании частиц износа полировального порошка на частицах износа угол, на который они отклонились после m столкновений ($\theta_{22} = 173,2^\circ = \text{const}$), и их координаты определялись формулами:

$$\Delta_{22m} = \begin{cases} 0, m = 0 \\ (m+1)\pi - \sum_{m=1}^m g_{22}, m \geq 1 \end{cases} , \quad (8)$$

$$X_{22m} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{22m} , \quad (9)$$

$$Z_{22m} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{22m} . \quad (10)$$

В результате расчета координат частиц в соответствие с формулами (2) – (10) (для $z_i = z_0 + d_i/2$, $z_0 = Ra$ – среднеарифметическое отклонение профиля обрабатываемой поверхности), после $m = 10$ и $m = 100$ столкновений установлено следующее. При рассеянии i -х частиц шлама на частицах шлама ($j = \overline{0,4}$) траектории их движения закручиваются (рис. 1, кривые 1 – 5) и частицы переходят на орбитальные траектории (рис. 2, кривые 1 – 5) [9], радиус которых тем больше, чем меньше размер рассеиваемых частиц (при уменьшении $i = \overline{0,4}$). Эти траектории представляют собой кольца, диаметр которых составляет 100 нм (для $i=0$), 60 нм (для $i=1$), 40 нм (для $i=2$), 30 нм (для $i=3$), 25 нм (для $i=4$), а ширина не превышает 10 нм. Все они расположены в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности (в окрестности прямой $z = z_0$), на основании чего можно сделать вывод, что частицы шлама после отрыва от обрабатываемой поверхности «перекатываются» вблизи от нее, находясь внутри суспензии в выделенных кольцевых каналах, что согласуется с классическими представлениями о процессе полирования.

При рассеивании частиц износа полировального порошка друг на друге они двигаются внутри суспензии аналогично самым мелким частицам шлама ($i = 0$) (рис. 1, кривая 7), закручиваясь и переходя на орбитальные траектории (рис. 2, кривая 7) диаметром более 150 нм.

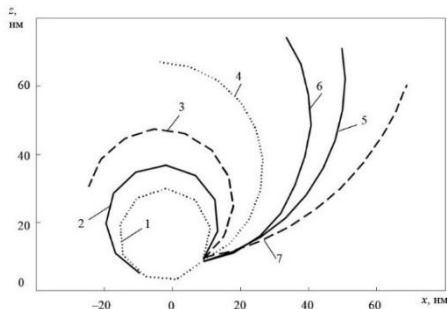


Рисунок 1 – Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 10$ столкновений:

1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ + ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ;
4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0, 4}$); 7 – ЧИ + ЧИ

При рассеивании частиц износа полировального порошка на i -х частицах шлама траектория их движения характеризуется кривой 6 (рис. 1), которая закручивается приблизительно как траектории движения самых мелких частиц шлама (кривая 5, рис. 1) и частиц износа полировального порошка после рассеивания друг на друге (кривая 7, рис. 1). Эти частицы не переходят на орбитальные траектории (рис. 2, кривая 6), а совершают движение по линиям близким к окружностям, расположенным в зоне шириной 100 нм, примыкающей к обрабатываемой поверхности ($z = z_0$).

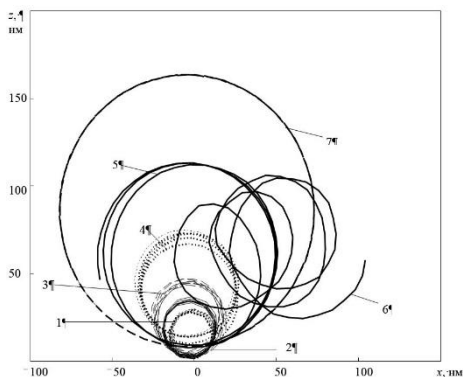


Рисунок 2 – Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 100$ столкновений:

1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ + ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ;
4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0, 4}$); 7 – ЧИ + ЧИ

Выводы

Анализ закономерностей рассеяния частиц шлама и износа полировального порошка на основе классической теории рассеяния частиц показал, что рассеяние частиц происходит на углы $[136,8^\circ - 173,2^\circ]$, а эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 0,4 – 1,8 Тб. Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц шлама и износа полировального порошка представляют собой кольца или линии близкие к окружностям, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности в зоне толщиной приблизительно 150 нм. На основании этого можно сделать вывод, что частицы шлама и износа полировального порошка, которые образовались вблизи обрабатываемой поверхности, «перекатываются» вдоль нее, находясь внутри суспензии в зоне, толщина которой приблизительно равна среднему радиусу зерна полировального порошка.

Список использованных источников: 1. Филатов Ю.Д., Rogov B.B. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO_2 -содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 3. Ч. 1. – С. 40–43. 2. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66. 3. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65. 4. Filatov Y.D., Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / Funct. mater. – 2016. – V. 23. – No. 1. – P. 104–110. 5. Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Conference Proceedings of International Conference «Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008». – 23–25 January 2008. – pp. 141–143. 6. Properties of the III-nitride semiconductors. – доступ: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>. 7. Davydov V.Yu., Kitaev Yu.E., Goncharuk I.N., et al., Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // Phys. Rev. B, 1998. – Vol. 58. – No. 19. – P. 12899–12907. 8. Zhuo Y., Ding W., Xua J., Yan C., An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy // Materials and Design, 2015. – Vol. 87. – P. 342–351. 9. Эйтинг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с. 10. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Ковалев С.В., Филатов А.Ю. // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. – N 52. – С. 201–207. 11. Филатов Ю.Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов / Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків. – 2009. – Вип. 2 (19). – С. 201–206. 12. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. Посібник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Либідь, 2002. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. Filatov Ju.D., Rogov V.V. Klasterijna model' mehanizma ustalostnogo iznosa SiO_2 -soderzhashhih materialov pri ih polirowanii instrumentom so svjazzannym polirowal'nym poroshkom na osnove dioksida cerija // Sverhtverdye materialy. – 1994. – № 3. Ch. 1. – S. 40–43. 2. Filatov Ju.D., Sidorko V.I. Statisticheskij podhod k iznosu poverhnostej detalej iz nemetallicheskih materialov pri polirowanii // Sverhtv. materialy. – 2005. – № 1. – S. 58–66. 3. Filatov Ju.D. Mehanizm obrazovanija mikrorel'efa poverhnosti pri obrabotke stekla // Sverhtv. materialy. – 1991. – № 5. – S. 61–65. 4. Filatov Y.D., Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V.

Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / *Funct. mater.* – 2016. – V. 23. – No. 1. – P. 104–110. **5.** *Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu.* Diamond-abrasive finishing for non-metallic materials // Conference Proceedings of International Conference «Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008». – 23–25 January 2008. – pp. 141–143. **6.** Properties of the III-nitride semiconductors. – *dostup: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>*. **7.** *Davydov V.Yu., Kitaev Yu.E., Goncharuk I.N.*, et al., Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev. V*, 1998. – Vol. 58. – No. 19. – P. 12899–12907. **8.** *Zhua Y., Dinga W., Xua J., Yan C.*, An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy // *Materials and Design*, 2015. – Vol. 87. – P. 342–351. **9.** *Jejring G., Lin S.G., Lin S.M.* Osnovy himicheskoy kinetiki: Per. s angl. – M.: Mir, 1983. – 528 s. **10.** Dinamika stolknovenij i rassejaniya chastic shlama v zone kontakta instrumenta i detali pri polirovanii stekla / *Filatov Ju.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov A.Ju.* // *Vesnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut»*. Mashinostroenie.– K.:NTUU «KPI».– 2008. – N 52.- S. 201-207. **11.** *Filatov Ju.D.* Vzaimodejstvie chastic shlama i iznosa v zone kontakta instrumenta i detali pri polirovanii nemetallicheskih materialov / *Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI»*. – Harkiv. – 2009.– Vip. 2 (19).– S. 201–206. **12.** *Juhnovs'kij I.R.* Osnovi kvantovoi mehaniki: Navch. Posibnik. – 2-ge vid., pererob. i dop. – *Libid'*, 2002. – 392 s.